引用格式：马伟强，马耀明，谢志鹏，等．喜马拉雅山区大气与环境综合观测研究支撑青藏高原地球系统科学发展．中国科学院院刊，2023，38(10)：1561-1571，doi：10.16418/j.issn.1000-3045.20231008003.
Ma W Q, Ma Y M, Xie Z P, et al. Comprehensive atmospheric and environmental observations in the Himalayan region advances development of Earth system science on the Tibetan Plateau. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(10): 1561-1571, doi: 10.16418/j.issn.1000-3045.20231008003. (in Chinese)

喜马拉雅山区大气与环境综合观测研究支撑青藏高原地球系统科学发展

马伟强[1,2]　马耀明[1,2*]　谢志鹏[1,2*]　陈学龙[1,2]　王宾宾[1,2]　韩存博[1,2]　李茂善[2,3]　仲　雷[2,4]　孙方林[2,5]
王忠彦[1,2]　席振华[1,2]　刘　莲[1,2]　马　彬[1,2]　胡　伟[1,2]

1 中国科学院青藏高原研究所　青藏高原地球系统与资源环境重点实验室　北京　100101
2 中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站　日喀则　858200
3 成都信息工程大学　大气科学学院　成都　610225
4 中国科学技术大学　地球和空间科学学院　合肥　230026
5 中国科学院西北生态环境资源研究院　兰州　730000

摘要　中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站（以下简称“珠峰站”）位于珠穆朗玛峰自然保护区核心区域，围绕我国青藏高原生态保护和生态文明高地建设及经济社会可持续发展的国家战略科技需求，致力于地球“第三极”复杂地形山地大气过程和环境变化研究。珠峰站以气候变化下青藏高原地-气相互作用过程研究为主线，开展了针对地表、大气、环境、冰川、生态和地球物理等过程的长期定位监测和野外科学观测试验；构建了珠峰地区多时空、多手段、高精度、多要素一体化地-气相互作用综合观测研究平台，显著提升了青藏高原特别是珠峰地区的气象观测能力。珠峰站是喜马拉雅山区地球系统科学研究的重要基地，为深入系统地开展青藏高原地球系统科学研究提供了基础数据，同时也为认识青藏高原在全球变化中的作用和对全球变化的响应提供了支撑平台。

关键词　珠穆朗玛峰，喜马拉雅山区，地-气相互作用，大气边界层，水热通量，全球变化

DOI　10.16418/j.issn.1000-3045.20231008003
CSTR　32128.14.CASbulletin.20231008003

*通信作者
资助项目：国家自然科学基金（U2242208、41830650、42230610、42375075），西藏自治区2023年中央引导地方科技发展资金（XZ202301YD0025C），第二次青藏高原综合科学考察研究（2019QZKK0103）
修改稿收到日期：2023年10月8日

喜马拉雅山区分布着以珠穆朗玛峰（以下简称“珠峰”）为代表的世界极高山群，是全球冰川积雪最密集的地区之一。该地区受复杂的地形、强烈的海-陆-气多圈层相互作用、交错分布的冰川、河流及积雪等因素的影响，形成了独特的大气环流系统及气候和环境特征，是青藏高原特殊大气过程集中表现的典型区域，为高原山地复杂地形条件下的气象学和生态环境科学观测研究提供了天然实验室[1]。

近年来，全球变暖导致珠峰地区的气候和环境发生了显著变化[2]，气温快速升高正在深刻影响珠峰地区的自然地理环境，具体表现为珠峰地区冰川整体萎缩，冰湖面积急剧扩张且湖泊数量增加，积雪覆盖面积降低且雪线高度攀升，植被持续变绿，生态系统总体向好等一系列环境要素的变化。这些变化通过地-气间的能量和水分循环过程，影响区域和全球的气候变化，以及局地大气和水文循环过程，造成极端天气气候事件频发，引发山体滑坡、泥石流、冰湖溃决等自然灾害，对当地群众的生命和财产安全，以及青藏高原水资源与生态环境均构成威胁。为了科学地认识该地区气候与环境的变化，我国科学家自20世纪中期开始，克服重重困难对珠峰地区开展了多次科学考察。然而，科学考察的方式观测持续时间短，不能全面了解该地区不同季节和长期的大气及环境变化过程，研究目标也存在片面性。因此，中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站（以下简称“珠峰站”）应运而生。在以珠峰北坡为代表的喜马拉雅山区建立长期的大气和环境综合观测研究站，对于全面地认识该地区及青藏高原在全球变化中的作用和对响应都有非常重要的科学意义。

珠峰站于第四次珠峰地区综合科学考察期间（2005年3—5月）开始建设，同年8月底竣工，并于2021年10月获批成为科学技术部国家野外科学观测研究站，国家站名为“西藏珠穆朗玛特殊大气过程与环境变化国家野外科学观测研究站”。珠峰站本部海拔4 276 m，距珠峰登山大本营约30 km，是珠峰北坡唯一的长期综合观测研究站，也是“中国高寒区地表过程与环境观测研究网络”及“第三极环境”（TPE）国际研究计划的重要野外台站。珠峰站以珠峰北坡地区高寒山地复杂地形下的大气过程和环境变化为核心问题，围绕地表多圈层地-气相互作用过程研究，建立并运行大气物理、大气环境、冰川、河流水文、植被生态要素等长期监测平台，聚焦于非均匀下垫面和复杂地形对青藏高原地-气相互作用过程和大气边界层过程的影响研究，立足于保护与建设高原生态安全屏障国家重大需求。目前，珠峰站已开展了针对珠峰北坡大气、水文、冰川、生态及地球物理等多圈层近20年的综合连续观测，建立了涵盖该地区典型下垫面特征的多时空、多手段、高精度、多要素一体化的综合观测体系，为深入认识青藏高原地-气耦合系统变化及对全球能量、水分循环的影响和机制提供了第一手科学数据和理论依据，服务于青藏高原地球系统科学模拟研究和区域可持续发展，推动了青藏高原生态文明建设和国家治藏方略的实施。

1 构建了珠峰地区多圈层地-气相互作用过程立体综合观测网络

复杂下垫面地-气相互作用及其天气气候效应研究是当前国际热点科学问题之一。为了深入认识高原复杂地形和地表特征下的地-气间能量水分交换特征和大气边界层结构特征，针对珠峰地区不同下垫面地表水热状况差异，沿绒布河谷建立了不同海拔梯度带涵盖冰川、高寒砾石、高寒灌丛、高寒湿地、高寒荒漠草原等主要地理生态单元的气象梯度观测体系（图1）[3]，实现了该地区多要素-多尺度-精细化的大气过程和环境变化梯度监测。建立关键带观测研究区，从站点-样带、流域、区域等尺度，开展了包括大气物理、大气环境、植被生态、水文过程、地球物理等在内的各类观测项目。其中针对大气物理的观测主要包

括边界层梯度观测系统、涡动协方差大气湍流观测系统、风廓线观测系统、无线电探空观测系统、土壤水热观测系统和地基多通道微波辐射计等。综合观测系统能够以从10 Hz到30 min不等的观测频率对大气湍流过程、近地面（0—40 m）和低层大气（80—5 000 m）的边界层结构变化（风速、风向、气温、相对湿度等）、地表辐射收支过程、土壤水热传输过程等各项气象要素进行实时连续的定位监测。这些多要素观测用于研究该区域边界层湍流特征、边界层水汽、二氧化碳、感热、潜热通量的湍流输送、边界层垂直结构特征及随时间的变化规律、地表辐射和能量平衡特征、土壤水热特性等，进而认识珠峰及周边地区的水汽输送和水循环，以及降水的时空分布与中尺度天气系统的影响。

在扩大并完善珠峰地区地-气相互作用综合观测网络的同时，珠峰站还进一步强化和规范了观测方法和数据质量控制流程，加强与国家科技资源共享服务平台等国家科技创新基地的衔接，制定野外台站观测数据开放共享工作规范，有序开放观测数据并提供共享服务。开放共享了珠峰站自建站以来的地-气相互作用过程综合观测数据[4]，有效推动了科学设施、科学数据等科技资源的开放共享。

2 分析珠峰地区湍流关键特征参数，揭示了该地区地-气间能量交换特征

空气动力学和热力学粗糙度等是影响地表与大气之间动量和能量交换的关键参数，对于地表过程和气候变化研究至关重要。基于站点地-气相互作用长期综合观测资料，开展地-气相互作用过程关键特征参数分析，有助于改进数值模式中陆面过程和大气边界层过

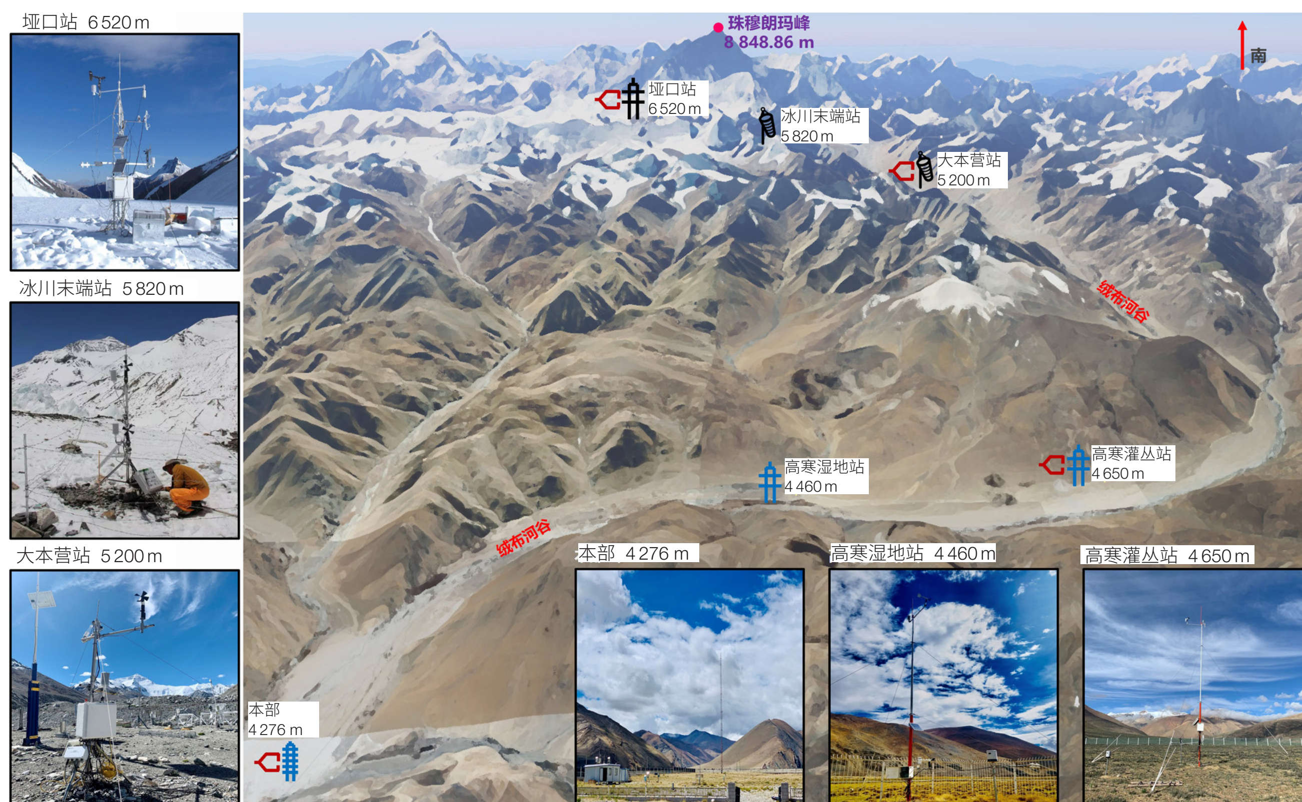


图1 珠峰地区多圈层地-气相互作用综合观测网络野外站点空间分布[3]

Figure 1 Spatial distribution of field stations in multi-layer comprehensive observation network for land-atmosphere interactions in Qomolangma region[3]

程的参数化方案描述，深化对复杂下垫面地-气相互作用关键科学问题的理解和认识。

珠峰站长期综合观测数据分析结果显示，绒布河谷地区近地层无因次风速分量方差和静力学稳定度的关系满足“1/3”次方规律，确认了Monin-Obukhov相似理论在这一地区的适用性[5]。基于涡动观测和气象资料，分析了珠峰地区动量总体系数（C_D）、热量总体输送系数（C_H）、空气动力学粗糙度（z_{0m}）、热力学粗糙度（z_{0h}）以及热输送附加阻尼系数（kB^{-1}）等地-气间物质和能量交换关键参数[6]，揭示了动力和热力学粗糙度、热输送附加阻尼等高原复杂地表湍流交换关键参数时空变化的“不定常”规律（图2），并指出目前数值模式中采用“定常”的特征参数会导致严重的“失真”效应。同时基于风温廓线资料、湍流观测资料以及地面气象观测资料确定了珠峰站所在区域的有效空气动力学粗糙度，指出山地地区的有效空气动力学粗糙度要比局地尺度的空气动力学粗糙度大1—2个量级[7]。高原复杂下垫面地表与大气之间物质和能量交换观测参数的研究，为提高天气气候模式在青藏高原地区的模拟精度奠定了基础。

受季风所带来的降水影响，珠峰地区地表感热通量和潜热通量随季节呈交替变化趋势[3,8]，表现为冬季感热和潜热通量强度相当，春季地表能量传输以感热为主而夏季则以潜热为主，并且季风强盛时期，潜热可达感热的2倍（图3c）。感热通量的变化主要受太阳辐射控制，而潜热通量的变化则受太阳辐射和降水共同影响。由于不同站点间下垫面地表状况和土壤物理性质（如土壤质地和土壤孔隙度）的差异，各站点地表能量平衡各分量虽然在季节上表现出一致的变化趋势，但感热通量、潜热通量及反射的短波辐射和发射的长波辐射在不同站点间差异明显[3]，这一结果凸显了针对复杂山区不同下垫面状况开展水热通量观测的必要性。此外，多年晴空日间辐射观测资料显示，短波向下辐射有不同程度的减小趋势，而长波向上辐射则有不同程度的逐年增加趋势[9]。

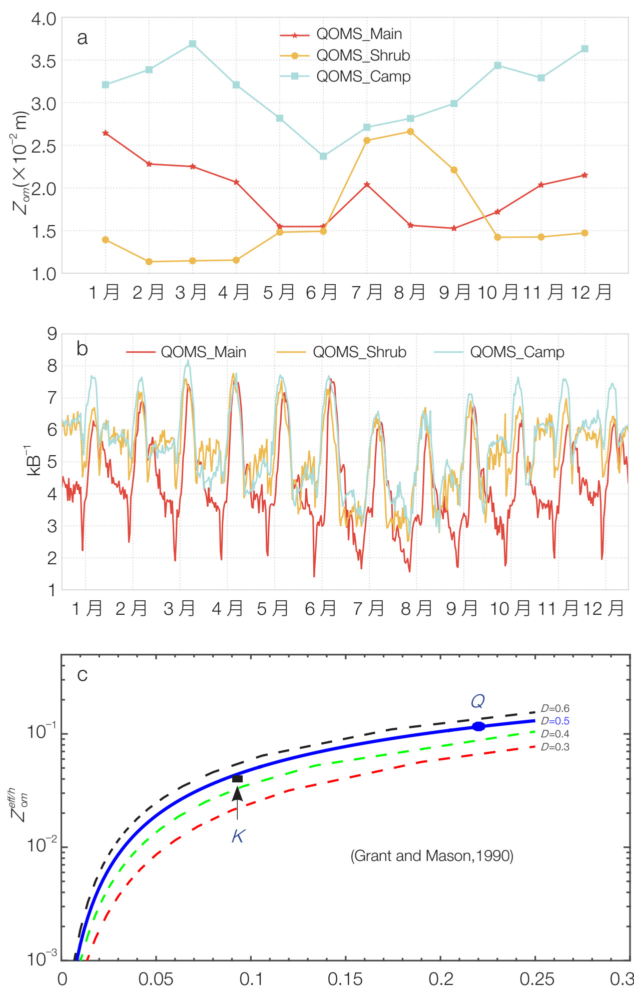


图2 珠峰地区湍流关键特征参数[3]

Figure 2 Characteristics of land surface turbulent flux parameters in Qomolangma region[3]

（a）空气动力学粗糙度季节变化特征；（b）热输送附加阻尼系数不同季节的日变化特征；（c）有效空气动力学粗糙度在不同拖曳系数取值下随λ的变化；珠峰站本部（QOMS_Main）、高寒灌丛站（QOMS_Shrub）、大本营站（QOMS_Camp）

(a) Seasonal variation in aerodynamic roughness length; (b) Diurnal variation in monthly mean excessive resistance for heat transfer; (c) Variation in effective aerodynamic roughness length against λ with different drag coefficient; QOMS_Main, QOMS_Shrub, and QOMS_Camp represents the center site of the network, the site located in shrub environments, and the site located at the north base camp of Mt. Qomolangma, respectively

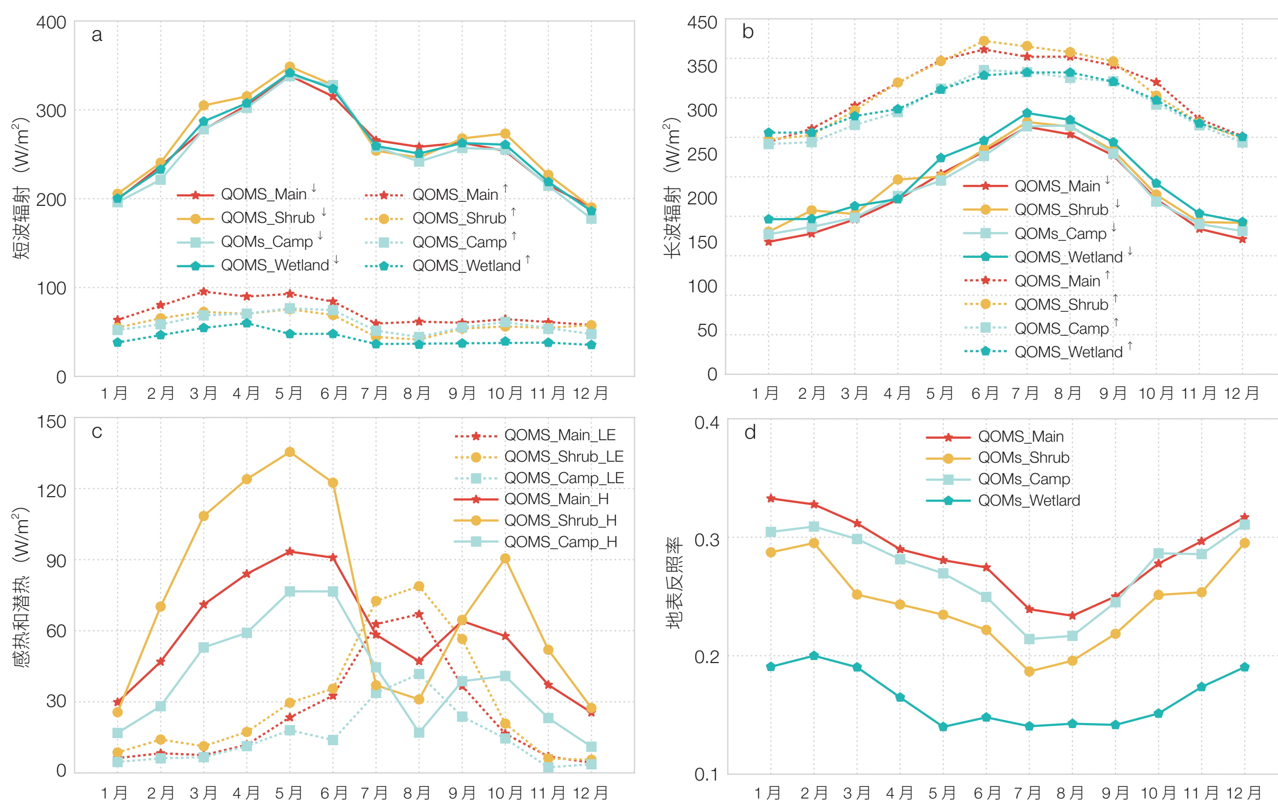


图3 珠峰地区2006—2021年期间多年平均地表辐射和湍流能量的季节变化特征[3]

Figure 3 Seasonal characteristics of multi-year average surface radiation and turbulent energy in the Qomolangma region from 2006 to 2021[3]

(a) 短波辐射；(b) 长波辐射；(c) 感热和潜热通量；(d) 地表反照率；珠峰站本部：QOMS_Main；高寒湿地站：QOMS_Wetland；高寒灌丛站：QOMS_Shrub；大本营站：QOMS_Camp

(a) Downward and upward shortwave radiation; (b) Downward and upward longwave radiation; (c) Sensible heat flux and latent heat flux; (d) Surface albedo; QOMS_Main, QOMS_Shrub, and QOMS_Camp represents the center site of the network, the site located in shrub environments, and the site located at the north base camp of Mt. Qomolangma, respectively

3 揭示了青藏高原复杂山地地形与西风环流相互作用及影响大气边界层发展的机制

大气边界层是地表和大气之间能量及物质交换的主要发生地，揭示珠峰地区大气边界层结构及其发展机制，可为深入理解该地区热量和水分收支状况、高原及其周边地区的天气和气候变化提供重要参考。

珠峰站目前配备有由大气边界层塔、无线电探空、微波辐射计、风廓线雷达组成的完备大气边界层综合观测系统，具备获取、处理和分析地面至中低空大气压力、温度、湿度、风速风向垂直结构的能力。大气边界层结构及大气环流特征分析结果显示，珠峰地区大气边界层高度存在明显的季节差异，一般来说季风爆发期和非季风期边界层发展深厚[10]，干季边界层高度要远大于湿季，并且受冰川风的影响，大气边界层高度日变化显著。珠峰地区下午风速强劲，一般而言非季风期盛行西南风而季风期则东南风占主导。非季风期珠峰地区下午近地层出现的西南强风是因为高空西风急流向下的动量传输引起；在季风期，由于西风带北移，珠峰地区不再受到西风急流控制，地形和南亚季风的作用使得珠峰站在下午出现东南强风[11]。中尺度天气预报模式（WRF）模式模拟结果也显示，在非季风期，珠峰站周围近地层出现的强烈西南风是受高空西风的影响，而季风期的东南风来自于

珠峰东部穿越喜马拉雅山脉南北的河谷[12]。

珠峰地区独特的局地环流特征受大尺度环流系统的影响[8,10-12]。例如，Lai等[10]的研究表明，当绒布河谷山脊高度以上的大尺度西风风向与山谷轴线方向平行时，西风动量更容易向下传输到山谷中，使得地表风速增大，感热通量增强，同时在山谷中会形成一个异常的局地热力驱动风（图4）。此外，珠峰地区周围复杂山地地形引发的山谷风和冰川风对该地区独特的局地环流特征的形成同样起着重要影响[3,8,10-13]。例如，冰川风的影响在15:00以后占主导地位，冰川风最大风速可达10 m/s，此时谷风消失，还造成局地的降温增湿[13]。与此同时，山地地形与西风大尺度环流系统的相互作用对喜马拉雅山中段北侧大气边界层的增长也起着关键作用，通过利用探空数据和地面站点观测数据、ERA5再分析资料及边界层模拟结果，阐明了喜马拉雅山中段深厚大气边界层的形成和发展机制[10]。

4 发展了复杂山区地表水热通量遥感反演算法和数值模式参数化方案，建立了卫星遥感反演地表水热通量的“点-面结合”理论

离散式“点”的观测资料仅能代表观测点或者某种特定地表特征下的地表能量过程，难以反应区域“面”的地-气间能量交换的实质，需要卫星遥感或者数值模式的结合才能将站点的观测结果扩展到区域。此外，复杂山区地表水热通量遥感反演和数值模式模拟结果的精度和不确定性，又需要地面实测的结果来加以评估和验证。因此，基于高寒山区完善的地面观测资料，检验遥感反演和数值模式模拟的水热通量结果的可靠性和适用性[14,15]，建立有效的估算地表水热通量的“点-面结合”方法[16-18]，是揭示复杂山区区域尺度地表水热通量交换特征的重要手段。

利用卫星遥感资料并结合珠峰站地面观测资料，估算了珠峰地区的地表特征参数（地表反照率、地表温度、NDVI等），再结合基于地面观测确定的地面和大气参数（如空气动力学粗糙度z_{0m}、热输送附加阻尼kB^{-1}等），推算出区域尺度的地表水热通量[16-19]，并在此基础上，建立了青藏高原卫星遥感与地面观测“点-面结合”的升尺度理论，提出了准确估算高原区域地表热通量的“马赛克近似”和“混合高度假设”新方法（图5），显著提高了地表水热通量的估算精度，并定量揭示了高原复杂地表水热状态及其变暖变湿的高分辨率时空分布特征[20]。基于站点观测资料，验证了包括MODIS、FY-2C等在内的遥感数据产品在该区域的准确性[14,15]，改进了地表能量平衡模型（SEBS）中的粗糙度方案[21]，进一步提高了数值模式高原地表水热通量的模拟精度。这些研究对于认识高海拔复杂地形区的能量和水分循环规律及其天气气候影响机理具有重要作用。

5 为国家重大活动开展、科学前沿探索及国家重大科技任务顺利实施提供了重要保障

珠峰站自建站以来始终坚持“观测、研究、支撑、服务”的主要功能和定位，作为珠峰地区重要的科考基地，珠峰站为该区域国家重大活动开展（如保障2008年北京奥运火炬成功登顶珠峰）、科学前沿探索、国家重大科技任务实施提供科研仪器、观测数据和支撑保障。随着基础设施条件的不断完善，珠峰站已成为支撑重大科技任务的科研基地，依托珠峰站平台支撑获批并实施了多项科研项目，如国家自然科学基金委重大研究计划、重点项目、国际（地区）合作与交流项目，第二次青藏高原综合科学考察项目，中国科学院战略性先导科技专项（A类），以及科学技术部国家重点研发计划重点专项等，很好地支撑了本区域科研活动的开展并推动了科学前沿的探索，有效提升了我国青藏高原研究的国际影响力。自2018年以来，随着中国科学院战略性先导科技专项（A类）“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”和第二次青藏

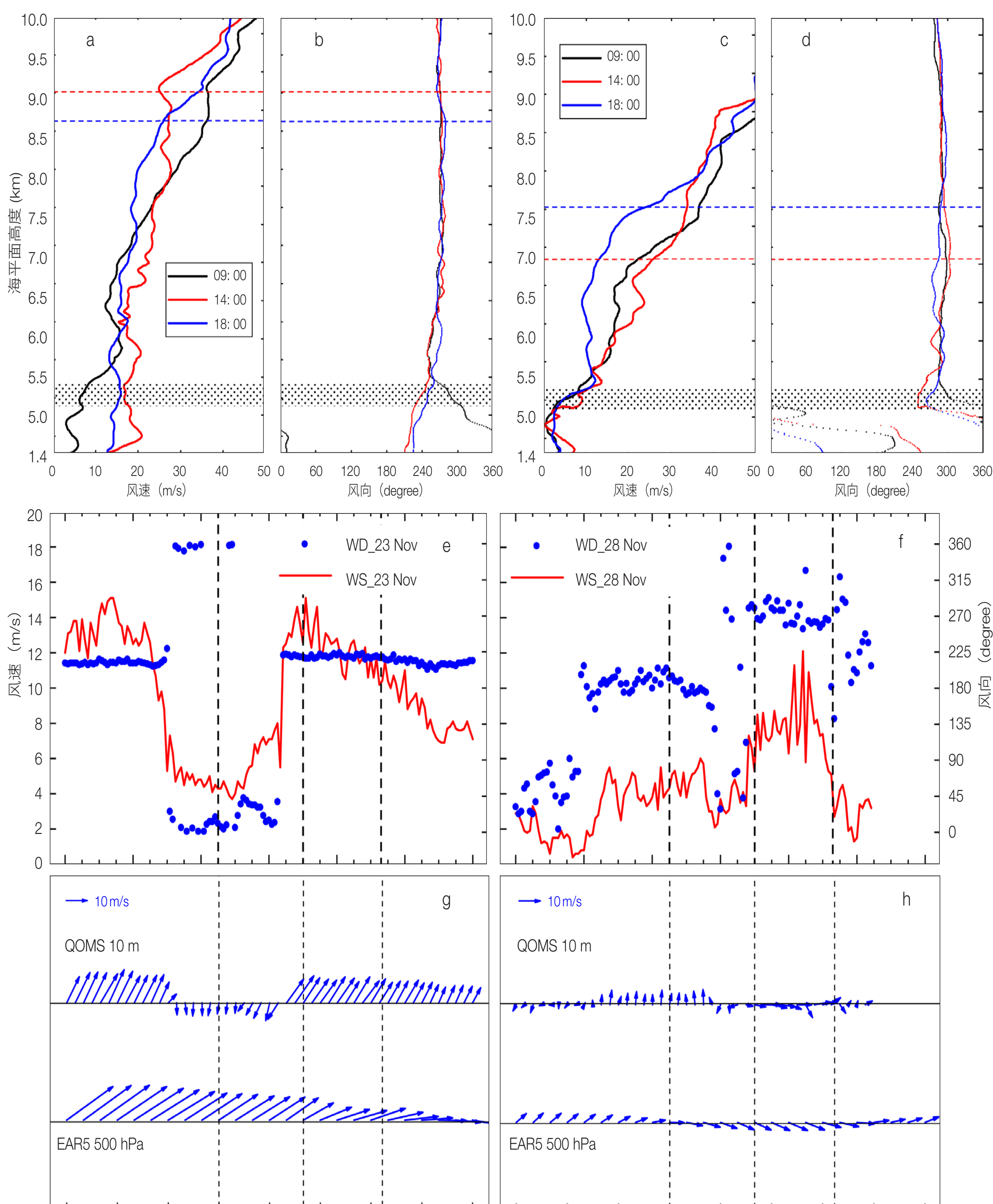


图4　2014年11月23日（a，b，e，g）和28日（c，d，f，h）风速风向的垂直廓线变化及近地层风速风向的变化[3]

Figure 4　Vertical profiles of wind speed and wind direction at QOMS_Main from radiosonde observations on two sunny days with distinct synoptic conditions (Nov. 23 and 28, 2014)[3]

*垂直虚线表示探空观测时间，水平虚线表示对应时次的对流边界层高度，灰色阴影为珠峰站周围山脊高度

*The horizontal dashed lines represent the corresponding tops of the convective boundary layer. The gray shading indicates the heights of the surrounding ridges

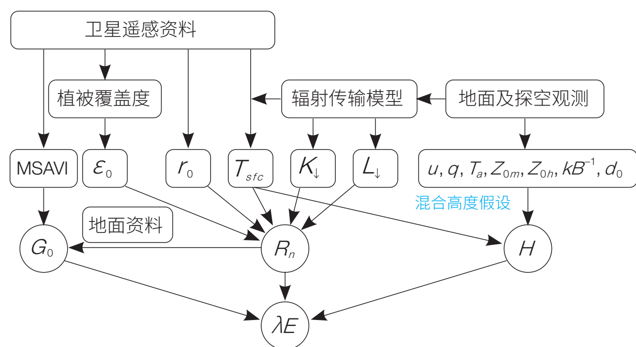


图5　卫星资料结合地面观测确定复杂地表能量通量的过程示意图[19]

Figure 5　Diagram of processes in determining surface energy fluxes under complex terrain by combining satellite data with ground in-situ observations[19]

高原综合科学考察研究的启动和实施，珠峰站成为更加重要的科学考察和研究基地。“巅峰使命2022”珠峰联合科考期间，珠峰站通过无线电探空、地基微波辐射计和激光测风雷达等手段开展大气垂直探测，实时获取了珠峰地区的三维大气结构特征[22]；在冲顶和浮空艇布放作业期间，开展加密探空观测试验，最大程度掌握珠峰实时天气条件变化，汇集各类气象观测数据，配合做好极端天气过程的观测和预报，参与珠峰科考气象保障团队天气会商，为科考队员安全、顺利登顶提供气象保障。总而言之，珠峰站通过持续观测和科技支撑，在不断推动区域科技发展和服务重大国家战略中展现更大担当、贡献更多力量。

6 结语

近20年来，珠峰站围绕珠峰这一重要特殊环境和高寒高海拔区域大气和环境变化，通过布局该区域基于大气环境变化的多学科交叉的国家野外科学观测研究站，构建了珠峰地区多时空、多手段、高精度、多要素一体化的地-气相互作用过程综合观测体系，从观测试验、卫星遥感、数值模拟3个角度，有效推动了复杂地表能量和水分循环规律及其天气气候影响机理的研究。

未来，珠峰站将借助国家站建设契机，围绕国家和西藏地方可持续发展需求，结合自身科学研究与学科发展特色，坚定“立足极地创新，成为创新高地”的思想，继续坚持将大气和环境过程长期监测、科学试验、卫星遥感和数值模拟等多手段结合的方式，开展从“点”到“面”、从“单位”到“系统”的技术集成与示范研究，加强硬件和软件建设，提升台站综合观测能力、基础研究水平及支撑科考活动的能力，使之成为支撑国家重大科研任务的高水平科技创新基地、支撑重大科考任务的野外科考基地、服务区域生态文明建设的示范基地、科学知识普及与传播的科普教育基地，实现“观测、研究、支撑、服务”的主要目标，打造成为有国际影响的青藏高原综合野外科学观测研究站。

参考文献

1 马耀明. 中国科学院珠穆朗玛峰大气与环境综合观测研究站：一个新的研究喜马拉雅山区地气相互作用过程的综合基地. 高原气象, 2007, 26(6): 1141-1145.
Ma Y M. An introduction to atmospheric and environmental comprehensive observation and research station on Mt. Qomolangma, Chinese academy of sciences (AECORSQ, CAS): A new base for the study of atmosphere-land interaction over the Himalaya area. Plateau Meteorology, 2007, 26(6): 1141-1145. (in Chinese)

2 Kang S C, Zhang Q G, Zhang Y L, et al. Warming and thawing in the Mt. Everest region: A review of climate and environmental changes. Earth-Science Reviews, 2022, 225: 103911.

3 Ma Y M, Xie Z P, Ma W Q, et al. QOMS: A comprehensive observation station for climate change research on the top of earth. Bulletin of the American Meteorological Society, 2023, 104(3): E563-E584.

4 Ma Y M, Hu Z Y, Xie Z P, et al. A long-term (2005-2016) dataset of hourly integrated land-atmosphere interaction observations on the Tibetan Plateau. Earth System Science

Data, 2020, 12(4): 2937-2957.

5 仲雷, 马耀明, 李茂善. 珠穆朗玛峰绒布河谷近地层大气湍流及能量输送特征分析. 大气科学, 2007, 31(1): 48-56.
Zhong L, Ma Y M, Li M S. An analysis of atmosphere turbulence and energy transfer characteristics of surface layer over rongbu valley in Mt. Qomolangma area. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2007, 31(1): 48-56. (in Chinese)

6 Wang S Z, Ma Y M. Characteristics of land-atmosphere interaction parameters over the Tibetan Plateau. Journal of Hydrometeorology, 2011, 12(4): 702-708.

7 Han C B, Ma Y M, Su Z B, et al. Estimates of effective aerodynamic roughness length over mountainous areas of the Tibetan Plateau. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2015, 141(689): 1457-1465.

8 Chen X L, Su Z B, Ma Y M, et al. Analysis of land-atmosphere interactions over the north region of Mt. Qomolangma (Mt. Everest). Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2012, 44(4): 412-422.

9 谷星月, 马耀明, 马伟强, 等. 青藏高原地表辐射通量的气候特征分析. 高原气象, 2018, 37(6): 1458-1469.
Gu X Y, Ma Y M, Ma W Q, et al. Climatic characteristics of surface radiation flux over the qinghai-tibetan plateau. Plateau Meteorology, 2018, 37(6): 1458-1469. (in Chinese)

10 Lai Y, Chen X L, Ma Y M, et al. Impacts of the westerlies on planetary boundary layer growth over a valley on the north side of the central Himalayas. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2021, 126(3): e2020JD033928.

11 Sun F L, Ma Y M, Hu Z Y, et al. Observation of strong winds on the northern slopes of mount Everest in monsoon season. Arctic, Antarctic, and Alpine Research, 2017, 49(4): 687-697.

12 Sun F L, Ma Y M, Hu Z Y, et al. Mechanism of daytime strong winds on the northern slopes of Himalayas, near mount Everest: Observation and simulation. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2018, 57(2): 255-272.

13 孙方林, 马耀明. 珠穆朗玛峰北坡地区河谷局地环流特征观测分析. 高原气象, 2007, 26(6): 1187-1190.
Sun F L, Ma Y M. Characteristics of local circulation in a Himalayan valley on the northern slop of Mt. Qomolangma. Plateau Meteorology, 2007, 26(6): 1187-1190. (in Chinese)

14 Hu Y Y, Zhong L, Ma Y M, et al. Estimation of the land surface temperature over the Tibetan Plateau by using Chinese FY-2C geostationary satellite data. Sensors, 2018, 18 (2): 376.

15 Chen X L, Su Z B, Ma Y M, et al. An accurate estimate of monthly mean land surface temperatures from MODIS clear-sky retrievals. Journal of Hydrometeorology, 2017, 18(10): 2827-2847.

16 Han C B, Ma Y M, Chen X L, et al. Estimates of land surface heat fluxes of the Mt. Everest region over the Tibetan Plateau utilizing ASTER data. Atmospheric Research, 2016, 168: 180-190.

17 田辉, 马耀明, 文军, 等. 秋季珠峰复杂地形下地表能量通量卫星遥感研究. 高原气象, 2007, 26(6): 1293-1299.
Tian H, Ma Y M, Wen J, et al. Study on autumn land surface fluxes over complex terrain using satellite remote sensing data over the Mt. Qomolangma region. Plateau Meteorology, 2007, 26(6): 1293-1299. (in Chinese)

18 马耀明, 王永杰, 马伟强, 等. 珠峰复杂地表区域能量通量的卫星遥感. 高原气象, 2007, 26(6): 1231-1236.
Ma Y M, Wang Y J, Ma W Q, et al. Determinating the regional distributions of surface heat fluxes over heterogeneous landscape of Mt. Qomolangma area using the satellite remote sensing and field observations. Plateau Meteorology, 2007, 26(6): 1231-1236. (in Chinese)

19 Ma Y M, Han C B, Zhong L, et al. Using MODIS and AVHRR data to determine regional surface heating field and heat flux distributions over the heterogeneous landscape of the Tibetan Plateau. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 117(3): 643-652.

20 Han C B, Ma Y M, Chen X L, et al. Trends of land surface heat fluxes on the Tibetan Plateau from 2001 to 2012. International Journal of Climatology, 2017, 37(14): 4757-4767.

21 Chen X L, Su Z B, Ma Y M, et al. An improvement of roughness height parameterization of the surface energy balance system (SEBS) over the Tibetan Plateau. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 2013, 52(3): 607-622.

22 Ma Y M, Ma W Q, Dai H G, et al. Earth summit mission 2022: Scientific expedition and research on Mt.

Qomolangma helps reveal the synergy between westerly winds and monsoon and the resulting climatic and environmental effects. Advances in Atmospheric Sciences, 2023, 40(2): 187-193.

Comprehensive atmospheric and environmental observations in the Himalayan region advances development of Earth system science on the Tibetan Plateau

MA Weiqiang[1,2]　MA Yaoming[1,2*]　XIE Zhipeng[1,2*]　CHEN Xuelong[1,2]　WANG Binbin[1,2]　HAN Cunbo[1,2]
LI Maoshan[2,3]　ZHONG Lei[2,4]　SUN Fanglin[2,5]　WANG Zhongyan[1,2]　XI Zhenhua[1,2]　LIU Lian[1,2]　MA Bin[1,2]　HU Wei[1,2]

（1 Key Laboratory of Tibetan Plateau Earth System, Environment and Resources,
Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;
2 Qomolangma Station for Atmospheric and Environmental Observation and Research,
Chinese Academy of Sciences, Shigatse 858200, China;
3 School of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China;
4 School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
5 Key Laboratory of Land Surface Process and Climate Change in Cold and Arid Regions,
Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China）

Abstract The Himalayan region, represented by Mount Qomolangma, is not only a typical area where special atmospheric processes on the Tibetan Plateau (TP) are concentrated, but also an important research area for climate, ecology, and environmental changes. The Qomolangma Station for Atmospheric and Environmental Observation and Research, Chinese Academy of Sciences (abbreviated as QOMS) is located in the core area of Mount Qomolangma National Nature Reserve. It is dedicated to studying the complex terrain mountain atmospheric processes and environmental changes of the Third Pole of the Earth, focusing on the land-atmosphere interaction process on the TP under the background of climate change. Based on long-term positioning monitoring and field scientific observations of surface, atmosphere, environment, glaciers, ecology, and geophysical processes, a comprehensive land-atmosphere interaction observation system over the TP represented by QOMS has been developed and designed. Key parameters of surface features that influence the material and energy exchange between land and atmosphere in this region have been identified. The interaction processes between complex mountainous terrain of the plateau and the westerly large-scale atmospheric circulation and its impact on the development of the atmospheric boundary layer have been revealed. Remote sensing inversion algorithms and parameterization schemes for estimating surface energy fluxes in the region have been developed and verified, and a theory of point-face combination for satellite remote sensing inversion of complex land surface water and heat flux on the TP has been established. The establishment of the multi-time and space, multi-means, high-precision, and multi-element integrated observation platform has significantly improved the meteorological observation capabilities of the TP, especially in the Qomolangma region. It not only provides basic data for in-depth systematized research on the Earth system of the TP, but also makes up for long-term observation deficiencies on the plateau and has made QOMS an irreplaceable base for global Earth system science research in the Himalayan

*Corresponding author

region, providing a support platform for understanding the role of the TP in global change and its response to global change.

Keywords Qomolangma, Himalayan, land-atmosphere interactions, atmospheric boundary layer, water and heat flux, global change

马伟强 中国科学院青藏高原研究所研究员，中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站站长。主要从事青藏高原高原遥感应用研究和地-气、湖-气观测与数值模拟研究。E-mail: wqma@itpcas.ac.cn

MA Weiqiang Professor of the Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is currently serving as the Director of the Qomolangma Station for Atmospheric and Environmental Observation and Research, CAS. His research mainly focuses on the application of remote sensing in the Tibetan Plateau, and investigating the interactions between land and atmosphere, as well as lake and atmosphere through observing and modeling. E-mail: wqma@itpcas.ac.cn

马耀明 中国科学院青藏高原研究所研究员，中国科学院珠穆朗玛大气与环境综合观测研究站学术站长。主要从事大气边界层观测及卫星遥感应用研究。E-mail: ymma@itpcas.ac.cn

MA Yaoming Professor of the Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (CAS). He is currently serving as the Academic Director of Qomolangma Station for Atmospheric and Environmental Observation and Research, CAS. He is mainly engaged in atmospheric boundary layer observation and satellite remote sensing application. E-mail: ymma@itpcas.ac.cn

谢志鹏 中国科学院青藏高原研究所副研究员。主要从事青藏高原积雪过程研究，建立了青藏高原风吹雪组网观测系统，发展了考虑风吹雪过程影响的风吹雪-陆面耦合模式。E-mail: zp_xie@itpcas.ac.cn.

XIE Zhipeng Associate Professor of the Institute of Tibetan Plateau Research, Chinese Academy of Sciences (CAS), specializing on snow processes on the Tibetan Plateau. He has established a wind-blown snow observation network over the Tibetan Plateau and developed a land surface model that takes the influence of wind-blown snow process into account. E-mail: zp_xie@itpcas.ac.cn

■责任编辑：张帆